

УДК 53.083.92

**РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УРОВНЕМЕРА С ФУНКЦИЕЙ  
МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО САМОКОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ КОНЦЕНТРАЦИОННОГО  
ЭФФЕКТА**

КАЛАШНИКОВ А.А.

*АО «Русатом автоматизированные системы управления» (АО «РАСУ»),  
(Москва, Российская Федерация)*

**Аннотация.** С внедрением и развитием программно-технических комплексов в современной энергетике наблюдается спрос к повышению уровня автоматизации, все большая роль в управлении технологическим процессом стала отводиться автоматике. Вследствие этого на современных АЭС нового поколения «3+» число измерительных каналов возросло более чем в 2,5 раза по отношению к проектам 2010 г. и стало составлять свыше 15 тысяч единиц на один энергоблок. Такие тенденции привели к новому промышленному вызову о необходимости оптимизации метрологического обслуживания АЭС, обновления подходов в организации метрологического обеспечения и создания качественно новых измерительных систем и средств измерений с функцией метрологического самоконтроля. В настоящей статье рассмотрены возможности и пути решения конструкторских задач по созданию такого интеллектуального уровнемера с функцией метрологического самоконтроля на основе концентрационного эффекта.

**Ключевые слова:** метрологический самоконтроль, измерение уровня жидких сред, концентрационный эффект

**DEVELOPMENT OF INTELLIGENT FLUID LEVEL SENSOR WITH METROLOGICAL  
SELF-CHECK FUNCTION BASED ON THE CONCENTRATION EFFECT**

ALEKSANDR.A. KALASHNIKOV

*JSC «Rusatom Automated Control Systems»,  
(Moscow, Russian Federation)*

**Abstract.** With the introduction and development of software and hardware complexes in modern power engineering, there is a demand for an increase in the level of automation, an increasing role in the control of the technological process began to be assigned to automation. As a result, at modern NPPs of the new generation "3+", the number of measuring channels has increased by more than 2.5 times in relation to the projects of 2010 year and has become more than 15 thousand measuring channels per NPP unit. This trends have led to a new industrial problem on the need to optimize the metrological service of NPPs, to update approaches to organizing metrological support and to create new intelligent measuring systems and measuring instruments with the of metrological self-check function. This article describes the possibilities and design ways for development of the intelligent fluid level sensor with metrological self-check function based on the concentration effect.

**Keywords:** metrological self-check, fluid level measurement, concentration effect

**Введение**

В 2019 г. в России произошло значимое событие в развитии метрологии, которое было отмечено на Международном конгрессе «19th International metrology congress CIM 2019» (Франция, Париж) [1]. Впервые в электроэнергетике РФ, на Саяно-Шушенской ГЭС, введена в эксплуатацию первая интеллектуальная измерительная система с функцией метрологического самоконтроля в современной классификации ГОСТ Р 8.734-2011 «Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы метрологического самоконтроля» [1, 2]. Это повысило надежность и точность автоматического контроля за перемещениями крышки гидротурбины и одновременно обеспечило повышение межповерочных интервалов датчиков с 1 года до 4 лет. На основе полученных результатов ПАО «РусГидро» принято решение об отраслевом внедрении таких интеллектуальных измерительных систем.

Столь значительные результаты позволяют рекомендовать разработку и развитие интеллектуальных измерительных систем и средств измерений с функцией метрологического самоконтроля в атомной отрасли с целью повышения уровня безопасной эксплуатации АЭС и оптимизации метрологического обслуживания. Последнее является особенно актуальным в связи с современными тенденциями многократного увеличения числа ИК и степени

автоматизации вновь проектируемых и строящихся энергоблоков АЭС российского дизайна поколения «З+».

Создание таких новых измерительных систем и средств измерений требует освоение новых принципов измерений, обеспечивающих выполнение метрологического самоконтроля. В части измерений уровня жидких и двухфазных сред наиболее перспективным является освоение концентрационного принципа измерений [3, 4].

Некоторые сведения о концентрационных элементах в электрохимии датируются XIX веком. Однако, из-за практической потребности в высоких значениях ЭДС самое широкое распространение в технике получили другие электрохимические элементы с гальваническими парами и сильными электролитами. Область же применения концентрационных элементов в промышленности практически ограничена кондуктометрами, pH-метрами и концентратомерами, которые в основном имеют сложные принципы работы и дорогостоящие конструкции, например, с применением каломельных или водородных электродов и электролитов с диффузионными барьерами [5 – 7].

В настоящей работе показаны перспективы применения концентрационных элементов для задач измерения уровня жидких сред и реализации метрологического самоконтроля. Разработка и возможность реализации вновь предлагаемого принципа базируется на результатах исследования свойств концентрационных элементов, проявляющихся на больших объемах измеряемых полярных и/или ионосодержащих жидкостей. Рассмотрим подробнее некоторые выявленные свойства концентрационных элементов, позволяющие реализовать метрологический самоконтроль уровнемеров.

#### **Некоторые результаты исследования свойств концентрационных элементов**

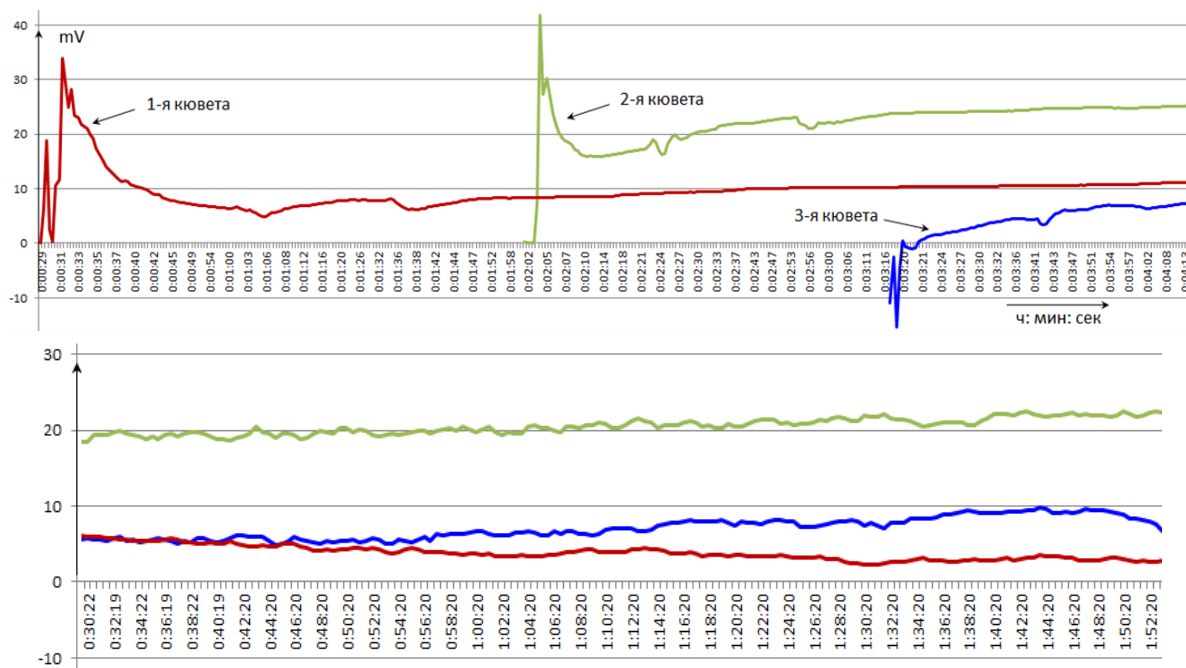
Для исследования свойств концентрационных элементов (ЭК) в ряде опытов выполнялось поочередное погружение одинаковых электродов в кювету с дистиллятом и другими полярными жидкостями. В качестве дистиллята использовался «Дистиллят бутилированный (для АКБ)» с электропроводимостью не более  $5 \cdot 10^{-4}$  См/м согласно данным сертификата. Задействованные в опытах электроды в основном выполнялись из одной жилы медного кабеля для обеспечения идентичности их составов. Кроме меди, использовались электроды из нержавеющей стали. Основные измерения производились мультиметром «М-830» с входным сопротивлением 1 МОм, что позволило измерять ЭДС самого концентрационного элемента непосредственно. В определенных опытах применялся гальванометр.

На рис. 1 представлены типовые характерные графики зависимости концентрационной ЭДС от времени, построенные на примере результатов одного из опытов с поочередным погружением медных электродов в кюветы с дистиллятом. Воспроизведение и запись результатов выполнена посредством фото-регистрации показаний мультиметра с максимальной частотой 10 кадр/сек

Появление и наличие ЭДС на концентрационных элементах объясняется законами электрохимии. Вкратце, процесс образования зарядов следующий. Полярные молекулы воды взаимодействуют с ионами меди. Происходит перенос ионов металла в воду, в которой образуются гидратированные ионы. Электрод приобретает электрический заряд, и на границе «металл - вода» возникает двойной электрический слой. Ввиду разных концентраций образовавшихся гидратированных ионов погруженные электроды приобретают разные по значению заряды. Далее происходит выравнивание концентраций ионов, приводящее к снижению разности потенциалов на электродах (ЭДС) до нуля по логарифмическим законам [6-8]. Другими словами, такая система стремится к своему электрическому равновесию.

При беглом поверхностном взгляде ничего примечательного в полученных результатах нет, но только не в аспекте изначально решаемой задачи измерений уровня жидких сред. На самом деле, первое, что показали поставленные опыты, на больших объемах даже слабых электролитов - полярных жидкостей - значение ЭДС достигает десятки и сотни мВ, а процессы падения ЭДС до нуля у ЭКС носят весьма инерционный характер (рис. 1). Так, на объемах дистиллята даже в пределах от 1 до 3 литров падение концентрационной ЭДС до нуля не наблюдалось при длительности опытов до 100 ч. На объеме дистиллята 1 литр были зарегистрированы лишь периодические переходы ЭДС через ноль со сменой знака, что само по себе является примечательным. В пробирочных объемах, менее 30 мл, падение значений ЭДС

до нуля длилось не более 20 мин. Отсюда справедливо констатировать, что с увеличением объема контактируемой полярной жидкости многократно растет инерционность процесса снижения ЭДС до нуля.



**Рис. 1.** Графики изменения концентрационной ЭДС во времени.  
Начальный бросок ЭДС - момент погружения электрода

Примечательными в аспекте электрохимии являются наблюдаемые колебания ЭДС с длинным периодом, достигающим нескольких часов. Так, детальная картография результатов измерений позволила установить, что такие длинные волны в изменениях ЭДС имеют свою условную «скользящую точку равновесия». В результате это может приводить даже к периодической смене полярности ЭДС. Предположительно это вызвано инерционностью процессов. При этом при погружении в одну кювету нескольких электродных пар колебания ЭДС на них никогда не совпадали во времени. В полученных результатах вызывает интерес не только смена полярности ЭДС, но и сам факт периодического роста ЭДС по модулю. Для максимально точного описания таких процессов и вывода математических закономерностей с учетом обратимого электродного потенциала, и ряда других факторов требуется отдельная детальная проработка.

Другими, значимыми в аспекте решаемой задачи, являются следующие установленные особенности ЭК:

- ЭДС концентрационных элементов в полярных средах, таких как дистиллированная вода и даже ацетон (диэлектрик), достигает десятки милливольт вольт;

- любое движение жидкости или вибрация электродов приводит к нарушению концентрационного равновесия, в связи с чем происходит рост ЭДС и возобновление химических реакций,

- на протяжении всего времени выравнивания потенциалов электродов наблюдаются хаотичные частые колебания ЭДС амплитудой до 0,3 мВ, а также длительные колебания (волны) в изменениях ЭДС с периодом до 5 часов, которые могут приводить к смене полярности электродов,

- концентрационные элементы устойчивы к образованию диэлектрических масляных пленок на электродах, обладают реакцией на нагрев или охлаждение одного из электродов, схожей с работой дифференциально включенных термпар.

- при контакте электродов с насыщенным паром концентрационная ЭДС не возникает,

- в условиях образования пленок жидкостей между электродами при дренировании кюветы концентрационная ЭДС мгновенно падает до нуля.

Подробно результаты поставленных экспериментов и описания перечисленных и других особенностей ЭЖ раскрыты в работе [3].

В совокупности установленные особенности ЭЖ позволяют реализовать концентрационный принцип измерений уровня жидкостей, обеспечивающий стабильную работу уровнемера в условиях однофазных и двухфазных насыщенных сред (пар-вода), проводящих жидкостей и полярных диэлектриков, а также в условиях измерения жидкостей с маслостоками. Преимущества концентрационного принципа перед известными гидростатическими, кондуктометрическими и емкостными методами измерений подтверждают целесообразность разработки соответствующего уровнемера.

### **Пути решения конструкторских задач в создании уровнемера с функцией метрологического самоконтроля**

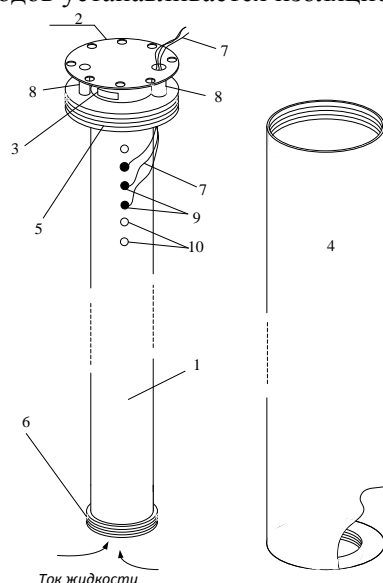
Уникальность концентрационного принципа состоит в том, что для кратковременных измерений уровня требуется только подключение вольтметра к электродам первичного преобразователя. Вследствие этого появляется возможность сочетать несколько принципов измерений уровня на базе одного унифицированного погружного зонда с электродами, расположенными на разной высоте. Так, например, в режиме концентрационных измерений уровень регистрируется по факту наличия ЭДС на электродах, погруженных в измеряемую жидкость, а в режиме кондуктометрических измерений уровень регистрируется по факту падения электрического сопротивления на тех же электродах, погруженных в измеряемую жидкость. Переключая режимы измерений, обеспечивается возможность реализации адаптивности датчика под изменения характеристик измеряемой среды, а также реализации метрологического самоконтроля. За счет этого расширяются возможности датчика, и повышается его надежность.

Например, в случае совмещения кондуктометрического и концентрационного принципов измерений уровня жидкости происходит следующая синергия. Концентрационный принцип позволяет измерять проводящие жидкости и все полярные диэлектрики, привносит стабильность работы уровнемера в условиях образования пленок проводящей жидкости между электродами, непроводящих масляных пленок на электродах, а также в условиях наличия насыщенного пара и интенсивной конденсации. Кондуктометрический принцип за счет подачи тока на электроды обеспечивает долговременную работу ЭЖ на малых объемах абсолютно неподвижных жидкостей. Естественно, такое техническое решение обеспечивает стабильную работу уровнемера в разных режимах работы технологического оборудования. Именно такие сочетания разных принципов работы и позволяют реализовывать функции адаптивности и метрологического самоконтроля датчиков.

Если задача постоянных измерений уровня требует проработки решений по обеспечению долговременной и стабильной работы концентрационных элементов на неподвижных жидкостях, то задача метрологического самоконтроля в этом отношении проще, так как не требует их долговременной работы. Длительности работы концентрационных элементов в 20 секунд более чем достаточно, чтобы оценить метрологическую исправность датчика и всего измерительного канала в целом.

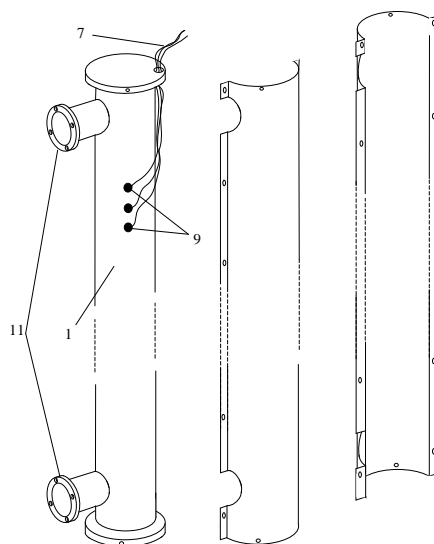
Конструкция такого датчика должна отвечать двум главным требованиям, электроды уровнемера должны быть электрически изолированы друг от друга, а его корпус должен быть герметичным. Один из возможных вариантов корпуса, позволяющий выполнить данные требования, а также обеспечить простоту сборки представлен на рис. 2. Основной корпус уровнемера в таком решении представляет собой трубу 1, заваренную сверху (фланец 2) и открытую снизу. В верхней части ниже крепёжного фланца находится прорезь 3 (одно или несколько отверстий) для сообщения давления со стороны технологической ёмкости во внутреннюю полость корпуса, что обеспечивает ток жидкости внутри уровнемера. Для установки защитного кожуха 4 предусмотрены резьбовые соединения 5 и 6. Для вывода кабельных связей 4 предусмотрена проходная трубка 8 (одна или несколько) через резьбовой верхний и крепёжный фланец. Электроды 9 монтируются таким образом, чтобы через отверстия 10 они выступали во внутренней полости корпуса для обеспечения контакта с измеряемой жидкостью. Для обеспечения изоляции между электродами либо сам корпус 1

выполняется из диэлектрических материалов, например, фторопласта или капролона, либо в отверстиях 10 до монтажа электродов устанавливается изоляционная прокладка.



**Рис. 2.** Корпус уровнемера с внутренней полостью для протока измеряемой жидкости

Исполнение корпуса, представленное на рис. 2, снижает гидравлическое воздействие (влияние динамического давления потоков) на электроды и обеспечивает ремонтпригодность уровнемера за счет возможности снятия защитного кожуха 4. Однако, для осуществления ремонта требуется демонтаж уровнемера, что несколько усложняет обслуживание. Для обеспечения ремонтпригодности без демонтажа уровнемера корпус 1 может быть выполнен в виде байпаса, соединяемого с технологической ёмкостью путем трубных проводок с фланцевыми соединениями 11 (рисунок 3). В таком случае уровнемер не занимает объема внутри технологической емкости и его обслуживание, и ремонт кабельных связей могут производиться без демонтажа.



**Рис. 3.** Байпасная конструкция уровнемера

Вышеуказанные конструктивные решения представляют собой унифицированную многоэлектродную конструкции первичного преобразователя, применимой для уровнемера с концентрационным, кондуктометрическим, емкостным и комбинированными принципами измерений. Реализация соответствующих разных режимов работы датчика будет определяться возможностями вторичной многоканальной аппаратуры.

Реализация функции метрологического самоконтроля в автоматическом режиме позволяет удаленно осуществлять диагностику технической и метрологической исправности датчика, что позволяет снизить воздействия вредных факторов на эксплуатационный персонал и сократить трудозатраты на периодическое обслуживание.

### Заключение

По результатам поставленных опытов установлено, что концентрационные элементы даже в условиях слабых электролитов представляют собой самостоятельные источники малых ЭДС, обладающих следующими основными особенностями:

- ЭДС концентрационных элементов даже в полярных средах, таких как дистиллированная вода и даже ацетон, достигает десятки милливольт вольт;

- протекание реакций и постепенное снижение ЭДС при высокоомной нагрузке имеет сильный инерционный характер. Так, на объемах дистиллята в пределах от 1 до 3 литров падение концентрационной ЭДС до нуля не наблюдалось при длительности опытов до 100 ч. На объеме дистиллята 1 литр были зарегистрированы лишь периодические переходы ЭДС через ноль со сменой знака;

- любое движение жидкости или вибрация электродов приводит к нарушению концентрационного равновесия, в связи, с чем происходит рост ЭДС и возобновление химических реакций,

- на протяжении всего времени выравнивания потенциалов на электродах наблюдаются хаотичные частые колебания ЭДС амплитудой в десятые доли мВ, а также длительные колебания (волны) в изменениях ЭДС с периодом до 5 часов, которые могут привести к смене полярности электродов,

- концентрационные элементы устойчивы к образованию диэлектрических масляных пленок на электродах, обладают реакцией на нагрев или охлаждение одного из электродов, схожей с работой дифференциально включенных термопар.

- при контакте электродов с насыщенным паром концентрационная ЭДС не возникает,

- в условиях образования пленок жидкостей между электродами при дренировании кюветы концентрационная ЭДС мгновенно падает до нуля.

Такие особенности позволяют реализовать концентрационный принцип измерений уровня жидкостей и реализовать функцию метрологического самоконтроля кондуктометрических, емкостных и потенциометрических уровнемеров. Это позволяет повысить надежность работы уровнемеров и сократить трудозатраты на их техническое и метрологическое обслуживание, решая тем самым актуальные проблемы современной энергетики.

### Список литературы

1. Sapozhnikova K, Baksheeva I, Taymanov R. Improving reliability of power plant equipment due to measurement information redundancy // Proceedings of 19th International congress of metrology. Paris, 2019. Art. num. 26004. 6 p. DOI: doi.org/10.1051/metrology/201926004
2. ГОСТ Р 8.734–2011 Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы метрологического самоконтроля. М.: Стандартинформ, 2011. 19 с.
3. Калашников А.А. Новое применение концентрационного эффекта в измерительной технике Ч.1: Об особенностях самообразующихся концентрационных элементов // Автоматизация в промышленности. 2020. №1. С 60 – 64
4. Патент № 2695588 RU. Способ измерения уровня жидкости и устройство для его осуществления (варианты) / А.А. Калашников. МПК G01F 23/22 (2006.01). опубл. 24.07.2019
5. Девис С., Джеймс А. Электрохимический словарь. М.: Мир, 1979. 281 с.
6. Скорчеллетти В.В. Теоретическая электрохимия. Л.: ГХИ, 1963. 608 с.
7. Ralph H. General Chemistry: Principles and Modern Applications. New York: Macmillan Coll Div, 1993. 1115 p.